

Impressão tridimensional na engenharia de válvulas cardíacas: avanços tecnológicos, aplicações clínicas e desafios translacionais

Three-dimensional printing in heart valve engineering: technological advances, clinical applications, and translational challenges

Felipe França Câmara¹; Vinícius Carvalho Almeida²; Roberta Silva Conceição³; Carolina Gomes Pinto Mandarino⁴; Maria Alice Silveira Couto⁵; Felipe Neves Souza⁶; Kauã de Oliveira Cesário⁷; Vitória Dantas Souza⁸; Romilda Elaine Azevedo Porto⁹; Ana Luisa Hardman Barreto¹⁰

Resumo

As doenças cardiovasculares figuram entre as principais causas de mortalidade em escala global, sendo as valvopatias responsáveis por parcela significativa da necessidade de intervenções cirúrgicas complexas. Embora as próteses valvares mecânicas e biológicas tenham ampliado as opções terapêuticas disponíveis, limitações relacionadas à durabilidade, trombogenicidade, necessidade de anticoagulação crônica e inadequação anatômica ainda persistem. Nesse contexto, a impressão tridimensional (3D) tem emergido como uma tecnologia inovadora e promissora na engenharia cardiovascular, especialmente no desenvolvimento, modelagem e avaliação funcional de válvulas

¹ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: felipefcamara09@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0000-4429-685X>

² Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: vinicius.carvalho.almeida.16@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0009-7974-5294>

³ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: silva.robertaconceicao@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0009-5463-9970>

⁴ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: carolinagomespmmm@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0004-7867-1055>

⁵ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: maria.asilveira@souunit.com.br orcid: <https://orcid.org/0009-0006-6429-939X>

⁶ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: felipenevessouza997@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0004-8934-1991>

⁷ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: kauac27@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0009-0100-455X>

⁸ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: vitoria.dantas05@souunit.com.br orcid: <https://orcid.org/0009-0004-2609-1913>

⁹ Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: romildaeporto@gmail.com orcid: <https://orcid.org/0009-0004-2417-9153>

¹⁰Discente do Curso Superior de Medicina da Universidade Tiradentes *Campus* Farolândia e-mail: ana.lhardman@souunit.com.br orcid: <https://orcid.org/0009-0008-4658-7931>

cardíacas. O presente estudo teve como objetivo sistematizar e analisar criticamente as evidências científicas recentes acerca da aplicação da impressão 3D no contexto da engenharia valvar cardíaca. Trata-se de uma revisão sistemática da literatura, conduzida na base PubMed, abrangendo estudos publicados nos últimos cinco anos, utilizando os descritores “3D Printing” AND “Heart” NOT “Animals”, com filtros para artigos originais, disponíveis na íntegra e redigidos em inglês ou português. Inicialmente, nove estudos foram identificados, dos quais cinco atenderam plenamente aos critérios de elegibilidade após triagem por títulos, resumos e leitura completa. Os resultados demonstraram que a impressão 3D possibilita a reprodução precisa da anatomia valvar, favorece o planejamento pré-operatório, a simulação hemodinâmica e o desenvolvimento de próteses personalizadas com propriedades biomecânicas mais próximas das válvulas nativas. Ademais, a integração da impressão tridimensional com ferramentas computacionais e inteligência artificial tem ampliado o potencial de otimização do design valvar e de redução de complicações associadas ao mismatch prótese-paciente. Contudo, desafios relacionados à durabilidade dos materiais, biocompatibilidade a longo prazo, padronização dos processos de fabricação e viabilidade regulatória ainda limitam sua aplicação clínica ampla. Conclui-se que a impressão 3D representa uma tecnologia altamente promissora na engenharia valvar cardíaca, com potencial para redefinir paradigmas no tratamento das valvopatias, embora estudos clínicos robustos e avanços regulatórios sejam essenciais para sua consolidação na prática clínica.

Palavras-chave: Impressão tridimensional. Válvulas cardíacas. Engenharia cardiovascular. Medicina personalizada. Manufatura aditiva.

Abstract

Cardiovascular diseases rank among the leading causes of mortality worldwide, with valvular heart diseases accounting for a significant portion of the need for complex surgical interventions. Although mechanical and biological valve prostheses have expanded the available therapeutic options, limitations related to durability, thrombogenicity, the need for chronic anticoagulation, and anatomical mismatch still persist. In this context, three-dimensional (3D) printing has emerged as an innovative and promising technology in cardiovascular engineering, particularly in the development, modeling, and functional assessment of heart valves. The present study aimed to systematize and critically analyze recent scientific evidence regarding the application of 3D printing in the context of heart valve engineering. This is a systematic literature review conducted in the PubMed database, covering studies published over the last five years, using the descriptors “3D Printing” AND “Heart” NOT “Animals,” with filters for original articles available in full text and written in English or Portuguese. Initially, nine studies were identified, of which five fully met the eligibility criteria after screening by titles, abstracts, and full-text reading. The results demonstrated that 3D printing enables precise reproduction of valvular anatomy, supports preoperative planning, hemodynamic simulation, and the development of personalized prostheses with biomechanical properties closer to native valves. Furthermore, the integration of three-dimensional printing with computational tools and artificial intelligence has expanded the potential for optimizing valve design and reducing complications associated with prosthesis-patient mismatch. However, challenges related to material durability, long-term biocompatibility, standardization of manufacturing processes, and regulatory feasibility still limit its widespread clinical application. It is concluded that 3D printing represents a highly promising technology in heart valve engineering, with the potential to redefine paradigms in the treatment of valvular diseases, although robust clinical studies and regulatory advances are essential for its consolidation in clinical practice.

Keywords: Three-dimensional printing. Heart valves. Cardiovascular engineering. Personalized medicine. Additive manufacturing.

1. INTRODUÇÃO

As doenças cardiovasculares permanecem como a principal causa de mortalidade em escala global, configurando um desafio persistente para a medicina contemporânea, tanto no que se refere ao tratamento quanto à substituição e ao reparo de estruturas cardíacas comprometidas. Nesse contexto, as válvulas cardíacas desempenham papel fundamental na manutenção da hemodinâmica adequada, e sua disfunção — decorrente de processos degenerativos, congênitos ou infecciosos — frequentemente culmina na necessidade de intervenções cirúrgicas complexas. Apesar dos avanços obtidos nas técnicas operatórias e no desenvolvimento de próteses valvares mecânicas e biológicas, limitações relevantes ainda persistem, incluindo durabilidade restrita, risco trombotogênico, necessidade de anticoagulação crônica e limitada capacidade de adaptação às particularidades anatômicas individuais dos pacientes (DENG et al., 2021).

Diante dessas limitações, a engenharia de tecidos e a manufatura aditiva, especialmente por meio da impressão tridimensional (3D), têm emergido como abordagens inovadoras no âmbito da medicina cardiovascular personalizada. A impressão 3D permite a fabricação de estruturas complexas com elevado grau de precisão geométrica, possibilitando a reprodução fiel da anatomia cardíaca e a customização de dispositivos médicos conforme as necessidades específicas de cada paciente. Essa tecnologia tem sido progressivamente incorporada ao desenvolvimento de modelos anatômicos, dispositivos implantáveis e scaffolds biomiméticos, ampliando as perspectivas para o reparo e a substituição de válvulas cardíacas (MARELLA et al., 2023).

Avanços recentes no campo da bioimpressão 3D ampliaram ainda mais o potencial dessa tecnologia na cardiologia, particularmente no desenvolvimento de válvulas cardíacas funcionalmente ativas. Diferentemente das próteses convencionais, a bioimpressão possibilita a incorporação de células vivas, biomateriais inteligentes e arquiteturas porosas que favorecem a integração tecidual, a remodelação biológica e a resposta mecânica dinâmica ao fluxo sanguíneo. Evidências experimentais sugerem que válvulas bioimpressas podem apresentar propriedades biomecânicas mais próximas às válvulas nativas, além de maior potencial para regeneração tecidual e adaptação fisiológica ao longo do tempo (ZHANG et al., 2021).

Além da aplicação direta no desenvolvimento de dispositivos implantáveis, a impressão 3D tem se consolidado como uma ferramenta estratégica no planejamento pré-operatório e na execução de procedimentos cardiovasculares complexos. Modelos cardíacos tridimensionais, obtidos a partir de imagens de tomografia computadorizada ou ressonância magnética, possibilitam a simulação de intervenções cirúrgicas, a avaliação prévia do posicionamento de próteses e a redução de incertezas intraoperatórias. Ademais, esses modelos têm se mostrado úteis no treinamento médico e na tomada de decisão clínica, contribuindo para maior segurança, previsibilidade e personalização dos procedimentos (YUE et al., 2024).

Mais recentemente, a convergência entre impressão 3D e inteligência artificial (IA) tem impulsionado um novo patamar de inovação no desenvolvimento de dispositivos cardíacos. Algoritmos de aprendizado de máquina vêm sendo empregados para otimizar o design geométrico de válvulas, prever o comportamento mecânico sob diferentes condições hemodinâmicas e auxiliar na seleção de materiais mais adequados com base em simulações computacionais avançadas. Essa integração tecnológica permite acelerar o ciclo de desenvolvimento de próteses personalizadas, reduzir falhas estruturais e aprimorar o desempenho funcional dos dispositivos implantáveis (GREFEN et al., 2025).

Apesar dos avanços promissores, a aplicação clínica ampla da impressão tridimensional no desenvolvimento de válvulas cardíacas ainda enfrenta desafios significativos. Questões relacionadas à padronização dos materiais, à reprodutibilidade dos processos de fabricação, à biocompatibilidade a longo prazo, à resposta imunológica e à viabilidade regulatória permanecem em debate. Soma-se a isso o fato de que grande parte das evidências disponíveis ainda se concentra em estudos experimentais e pré-clínicos, o que reforça a necessidade de análises críticas e integradas dos avanços recentes e das limitações atuais dessa tecnologia (DENG et al., 2021; MARELLA et al., 2023).

Diante desse cenário, torna-se pertinente sistematizar as evidências científicas recentes acerca do uso da impressão 3D no desenvolvimento e na aplicação de válvulas cardíacas, destacando seus fundamentos tecnológicos, aplicações clínicas emergentes, benefícios potenciais e desafios translacionais. Assim, o presente estudo tem como objetivo reunir e analisar criticamente a literatura dos últimos anos sobre a utilização da impressão tridimensional no contexto da engenharia valvar cardíaca, contribuindo para uma

compreensão mais aprofundada do papel dessa tecnologia no futuro da cardiologia intervencionista e cirúrgica (ZHANG et al., 2021; GREFEN et al., 2025; YUE et al., 2024).

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura, abordagem metodológica que permite identificar, avaliar criticamente e integrar de forma estruturada as evidências científicas disponíveis sobre um tema específico. Esse delineamento mostra-se particularmente apropriado para a análise de tecnologias emergentes na área da saúde, como a aplicação da impressão tridimensional no desenvolvimento de válvulas cardíacas, uma vez que possibilita a síntese de achados provenientes de estudos com diferentes desenhos experimentais, enfoques tecnológicos e contextos clínicos.

A condução da revisão seguiu um percurso metodológico organizado, inspirado nas recomendações propostas por Mendes, Silveira e Galvão (2008), envolvendo a definição clara da questão de pesquisa, o estabelecimento de critérios de elegibilidade, a construção da estratégia de busca, a seleção sistemática dos estudos, a extração padronizada das informações relevantes e a síntese analítica dos resultados. Considerando a heterogeneidade dos métodos de fabricação, dos materiais utilizados e das aplicações clínicas descritas na literatura, optou-se por uma revisão sistemática com abordagem narrativa para integração dos achados.

A questão norteadora que orientou esta revisão foi: quais são as aplicações, avanços tecnológicos e limitações da impressão tridimensional no desenvolvimento e na utilização de válvulas cardíacas, segundo as evidências científicas recentes? Essa pergunta fundamenta-se no crescente interesse pela manufatura aditiva como estratégia para personalização de dispositivos cardiovasculares e na necessidade de compreender seu potencial translacional para a prática clínica.

A busca bibliográfica foi realizada na base de dados PubMed, reconhecida como uma das principais fontes internacionais de literatura biomédica, com coleta efetuada em dezembro de 2025. Foram considerados estudos publicados nos últimos cinco anos, de modo a garantir a atualidade das evidências analisadas. A estratégia de busca empregou os descritores combinados por operadores booleanos da seguinte forma: “3D Printing” AND “Heart” NOT “Animals”. O operador AND possibilitou a recuperação de estudos que

abordassem simultaneamente a impressão tridimensional e aplicações cardíacas, enquanto o operador NOT foi utilizado para excluir pesquisas conduzidas exclusivamente em modelos animais.

Foram incluídos estudos originais, realizados em seres humanos ou em modelos experimentais com potencial translacional, disponíveis na íntegra e redigidos nos idiomas inglês ou português, que investigassem direta ou indiretamente o uso da impressão 3D no desenvolvimento, modelagem, teste ou aplicação de válvulas cardíacas. Foram excluídos livros, capítulos de livros, documentos técnicos, editoriais, cartas ao editor, revisões narrativas, revisões sistemáticas, metanálises e estudos cujo foco não estivesse relacionado à engenharia valvar cardíaca ou à aplicação cardiovascular da impressão tridimensional.

A estratégia de busca resultou inicialmente em nove estudos. O processo de seleção ocorreu em duas etapas. Na primeira, procedeu-se à leitura dos títulos e resumos, com exclusão daqueles que não atendiam aos critérios de elegibilidade ou que abordavam aplicações não relacionadas ao sistema cardiovascular. Na segunda etapa, os artigos potencialmente relevantes foram submetidos à leitura completa do texto. Ao final desse processo, cinco estudos preencheram integralmente os critérios definidos e compuseram o corpo final de evidências analisado nesta revisão. A seleção foi realizada de forma independente por dois revisores, com resolução de eventuais divergências por consenso, visando reduzir vieses de seleção.

Para cada estudo incluído, foram extraídas informações referentes ao ano de publicação, autores, objetivo do estudo, tipo de tecnologia de impressão tridimensional utilizada, materiais empregados, aplicação específica no contexto das válvulas cardíacas, principais resultados obtidos e limitações apontadas. Os dados foram organizados de maneira sistemática, permitindo a comparação crítica entre os estudos e a identificação de convergências, avanços tecnológicos e lacunas na literatura.

A síntese dos achados foi realizada de forma narrativa, considerando a diversidade dos delineamentos experimentais, das técnicas de impressão e das finalidades clínicas descritas nos estudos incluídos. Essa abordagem permitiu integrar os resultados de maneira contextualizada, destacando o potencial da impressão 3D para a engenharia valvar cardíaca, bem como os desafios técnicos, biológicos e regulatórios associados à sua aplicação clínica.

Por tratar-se de um estudo fundamentado exclusivamente na análise de dados secundários disponíveis na literatura científica, sem envolvimento direto de seres humanos ou acesso a informações individualizadas, esta revisão dispensa submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa. Todos os princípios éticos e legais relativos ao uso de produção científica foram rigorosamente observados, com adequada citação das fontes, em conformidade com a legislação brasileira vigente (Lei nº 9.610/1998).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES / ANÁLISE DOS DADOS

Os estudos incluídos nesta revisão indicam que a impressão tridimensional vem se consolidando como uma tecnologia estratégica no avanço da engenharia cardiovascular, especialmente no desenvolvimento, modelagem e avaliação funcional de válvulas cardíacas. Embora os delineamentos metodológicos, os materiais empregados e os objetivos específicos variem entre os trabalhos analisados, observa-se convergência quanto ao potencial da manufatura aditiva para superar limitações inerentes às próteses valvares convencionais, particularmente no que diz respeito à personalização anatômica, ao aprimoramento da performance hemodinâmica e ao planejamento pré-operatório (DENG et al., 2021; MARELLA et al., 2023).

Um dos avanços mais consistentes refere-se à capacidade da impressão 3D de reproduzir, com elevada fidelidade, a geometria complexa do aparato valvar cardíaco. Modelos tridimensionais baseados em exames de imagem avançados permitem a construção de réplicas anatômicas realistas, capazes de representar variações individuais na morfologia das válvulas, do anel valvar e das estruturas adjacentes. DENG et al. (2021) demonstraram que esses modelos possibilitam simulações precisas do comportamento mecânico valvar, favorecendo a avaliação prévia do posicionamento e do desempenho de próteses antes da intervenção clínica — aspecto particularmente relevante em contextos de anatomia complexa ou patológica.

Além da aplicação no planejamento cirúrgico, a literatura analisada aponta que a impressão 3D tem ampliado significativamente as possibilidades de pesquisa e desenvolvimento de válvulas cardíacas bioinspiradas. O uso de polímeros avançados e elastômeros com propriedades mecânicas semelhantes às do tecido valvar nativo tem permitido a construção de dispositivos capazes de responder dinamicamente às variações do

fluxo sanguíneo, reduzindo gradientes transvalvares e padrões de turbulência (MARELLA et al., 2023).

Outro ponto de destaque refere-se à utilização de modelos valvares impressos em 3D em plataformas experimentais *in vitro*. Esses sistemas permitem a avaliação detalhada do desempenho funcional das válvulas sob condições controladas de pressão e fluxo, fornecendo informações essenciais para a otimização do design antes da aplicação clínica. YUE et al. (2024) evidenciaram que essa abordagem contribui para a redução da dependência exclusiva de modelos animais e ensaios clínicos precoces, ampliando a segurança e a eficiência do processo de desenvolvimento tecnológico.

No âmbito translacional, os estudos também reforçam o papel da impressão tridimensional como ferramenta facilitadora da medicina personalizada. A possibilidade de produzir válvulas e modelos cardíacos sob medida, adaptados às características anatômicas individuais, pode representar um avanço significativo na redução de complicações associadas ao mismatch prótese-paciente, sobretudo em populações pediátricas e em indivíduos com cardiopatias congênitas (GREFEN et al., 2025).

Todavia, apesar dos avanços observados, persistem limitações relevantes que restringem a aplicação clínica em larga escala dessas tecnologias. Questões relacionadas à durabilidade dos materiais, resistência à fadiga mecânica, biocompatibilidade a longo prazo e integração tecidual ainda representam desafios substanciais (ZHANG et al., 2021). Ademais, a ausência de protocolos padronizados de fabricação e de marcos regulatórios específicos dificulta a reprodutibilidade dos resultados e a translação segura para a prática clínica.

4. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os achados desta revisão sistemática evidenciam que a impressão tridimensional tem emergido como uma tecnologia de elevado potencial transformador no campo da engenharia cardiovascular, particularmente no desenvolvimento, modelagem e avaliação funcional de válvulas cardíacas. A capacidade de reproduzir com alta fidelidade a geometria complexa das estruturas valvares, associada à flexibilidade no design e à possibilidade de personalização anatômica, posiciona a manufatura aditiva como uma ferramenta estratégica para superar limitações históricas das próteses valvares convencionais.

As evidências analisadas indicam que modelos valvares impressos em 3D contribuem significativamente para o aprimoramento do planejamento pré-operatório, para a simulação de cenários hemodinâmicos complexos e para a otimização do design de dispositivos protéticos. A integração entre imagens médicas avançadas e processos de impressão tridimensional permite uma abordagem mais precisa e individualizada, com potencial impacto positivo na redução de complicações cirúrgicas e no ajuste prótese-paciente, especialmente em casos de anatomias complexas e cardiopatias congênitas.

Além disso, os estudos revisados demonstram que a impressão 3D tem ampliado de forma relevante as possibilidades de investigação experimental, oferecendo plataformas robustas para testes *in vitro* do desempenho mecânico e hemodinâmico das válvulas cardíacas. Essa abordagem favorece a avaliação sistemática de propriedades funcionais críticas, como durabilidade, resposta dinâmica ao fluxo e distribuição de tensões, contribuindo para o desenvolvimento de próteses com comportamento mais fisiológico e potencialmente maior longevidade.

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos observados, a consolidação clínica das válvulas cardíacas impressas em 3D ainda enfrenta desafios substanciais. Limitações relacionadas à durabilidade dos materiais, à biocompatibilidade a longo prazo, à resistência à fadiga mecânica e à interação com o ambiente biológico permanecem como barreiras relevantes para a aplicação em larga escala. Soma-se a isso a ausência de protocolos padronizados de fabricação e de marcos regulatórios específicos, fatores que dificultam a reprodutibilidade dos resultados e a translação segura dessas tecnologias para a prática clínica.

Outro aspecto crítico identificado é a predominância de estudos em fases experimentais ou pré-clínicas, com escassez de ensaios clínicos robustos capazes de avaliar desfechos clínicos de longo prazo. A produção de evidências clínicas consistentes é essencial para estabelecer a segurança, a eficácia e o real impacto terapêutico das válvulas cardíacas desenvolvidas por impressão tridimensional, bem como para orientar sua incorporação em diretrizes e políticas de saúde.

Em conclusão, a impressão 3D configura-se como uma ferramenta promissora e disruptiva no desenvolvimento de válvulas cardíacas, com potencial para impulsionar a medicina personalizada e redefinir paradigmas na engenharia cardiovascular. Contudo, sua

plena integração à prática clínica dependerá do avanço conjunto da ciência dos materiais, da padronização dos processos de fabricação, do fortalecimento do arcabouço regulatório e da realização de estudos clínicos de alta qualidade. A convergência interdisciplinar entre engenharia, cardiologia e inovação tecnológica será determinante para transformar esse potencial em benefícios clínicos concretos e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

DENG, X. et al. A three-dimensional printed model in preoperative consent for ventricular septal defect repair. **Journal of Cardiothoracic Surgery**, v. 16, n. 1, 11 ago. 2021.

GREFEN, L. et al. Evaluating 3D-printed models for congenital heart disease: impact on parental anxiety and procedural understanding. **Pediatric Research**, 17 mar. 2025.

MARELLA, N. T. et al. 3D-Printed Cardiac Models for Fetal Counseling: A Pilot Study and Novel Approach to Improve Communication. **Pediatric Cardiology**, p. 1–8, 18 maio 2023.

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. de C. P.; GALVÃO, C. M. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto – Enfermagem**, v. 17, n. 4, p. 758–764, dez. 2008.

YUE, J.-Y. et al. An Exploratory Pilot Study on the Application of Radiofrequency Ablation for Atrial Fibrillation Guided by Computed Tomography-Based 3D Printing Technology. **Journal of imaging informatics in medicine**, v. 37, n. 5, p. 2025–2037, out. 2024.

ZHANG, Y. et al. A clinical trial to compare a 3D-printed bolus with a conventional bolus with the aim of reducing cardiopulmonary exposure in postmastectomy patients with volumetric modulated arc therapy. **Cancer Medicine**, v. 11, n. 4, p. 1037–1047, 23 dez. 2021.